



**KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH GmbH**

Institut für Nukleare Sicherheitsforschung

**Statistische Untersuchungen  
zum Ausfallverhalten von Komponenten  
des Versuchskernkraftwerks der AVR**

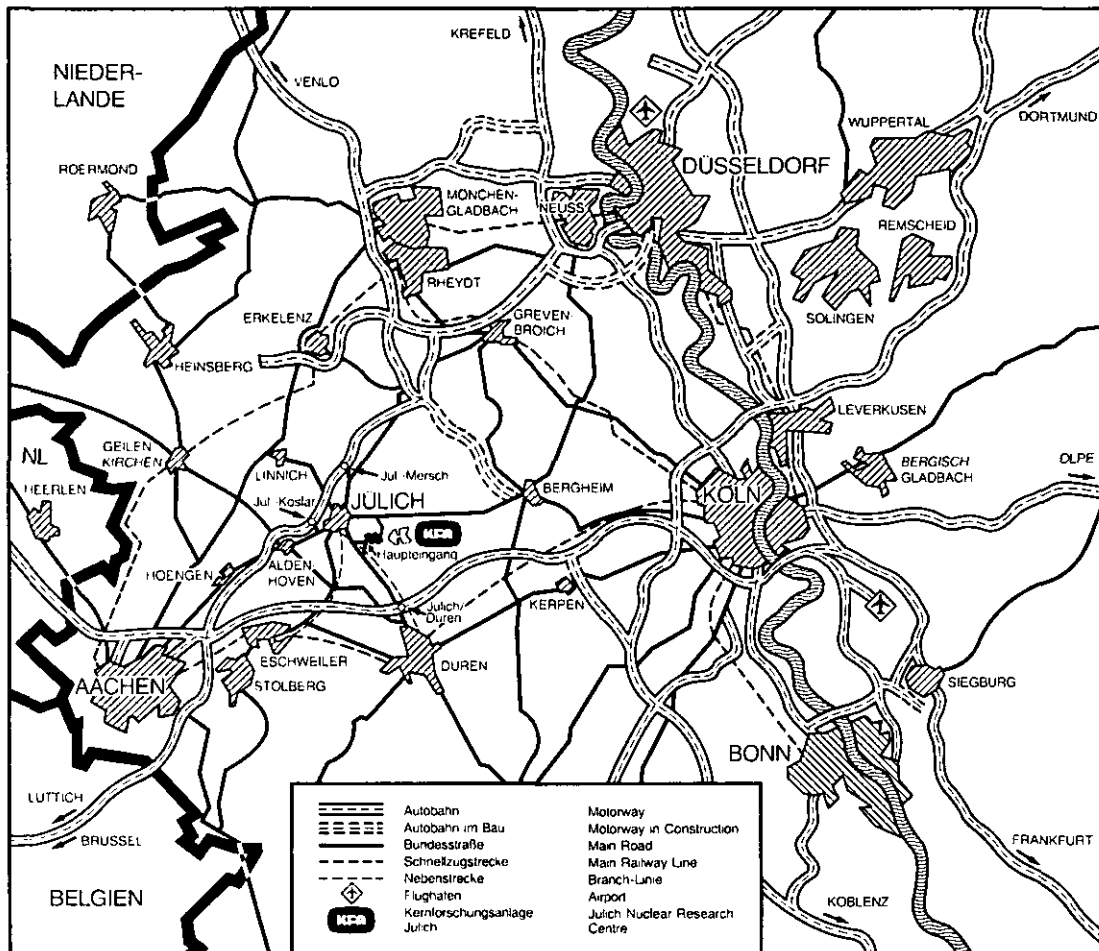
**Band I: Ausfallraten von Armaturen in  
Gaskreisläufen, Einfluß von  
Umgebungs- und Einsatzbedingungen**

von

Hans-Jürgen Hantke

Hrsg: Wilfried Hennings

**Jül-Spez-514 Bd. I**  
**August 1989**  
ISSN 0343-7639



Als Manuskript gedruckt

**Spezielle Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 514 Bd. I**  
**Institut für Nukleare Sicherheitsforschung Jül-Spez-514 Bd. I**

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH  
 Postfach 1913 · D-5170 Jülich (Bundesrepublik Deutschland)  
 Telefon: 02461/610 · Telex: 833556-0 kf d

**Statistische Untersuchungen  
zum Ausfallverhalten von Komponenten  
des Versuchskernkraftwerks der AVR**

**Band I: Ausfallraten von Armaturen in  
Gaskreisläufen, Einfluß von  
Umgebungs- und Einsatzbedingungen**

von

Hans-Jürgen Hantke<sup>1</sup>

Hrsg: Wilfried Hennings<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Hantke Energietechnik (HET), Fürstenfeldbruck

<sup>2</sup>KFA – Institut für Nukleare Sicherheitsforschung

STATISTICAL INVESTIGATIONS OF THE FAILURE BEHAVIOUR OF  
COMPONENTS IN THE AVR-EXPERIMENTAL NUCLEAR POWER PLANT

Vol. I: Failure Rates of Valves in Gas Circuits,  
Influence of Environmental and Operational Conditions

by Hans-Jürgen Hantke<sup>1</sup>

Ed.: Wilfried Hennings<sup>2</sup>

ABSTRACT

From operational reports of the years 1970 to 1984, failure rates of valves in gas circuits of the AVR experimental power plant were determined. Also, potential influences of environmental and operational conditions were investigated.

The resulting failure rates are  
for manual valves app.  $0,1 \cdot 10^{-6}/h$ ,  
for pneumatic valves between 3 and  $9 \cdot 10^{-6}/h$ ,  
for solenoid valves between 1,5 and  $4 \cdot 10^{-6}/h$  and  
for control valves between 12 and  $41 \cdot 10^{-6}/h$ .

---

<sup>1</sup> Hantke Energietechnik (HET), Fürstenfeldbruck

<sup>2</sup> KFA - ISF

STATISTISCHE UNTERSUCHUNGEN ZUM AUSFALLVERHALTEN VON  
KOMPONENTEN DES VERSUCHSKERNKRAFTWERKS DER AVR

Band I: Ausfallraten von Armaturen in Gaskreisläufen,  
Einfluß von Umgebungs- und Einsatzbedingungen

von Hans-Jürgen Hantke<sup>1</sup>

Hrsg.: Wilfried Hennings<sup>2</sup>

KURZFASSUNG

Aus Betriebsaufzeichnungen der Jahre 1970-1984 wurden die Ausfallraten von Ventilen in Gaskreisläufen des AVR-Versuchskernkraftwerks bestimmt. Mögliche Betriebs- und Umgebungseinflüsse wurden untersucht.

Die ermittelten Ausfallraten betragen  
für Handventile etwa  $0,1 \cdot 10^{-6}/h$ ,  
für pneumatische Ventile zwischen  $3$  und  $9 \cdot 10^{-6}/h$ ,  
für Magnetventile zwischen  $1,5$  und  $4 \cdot 10^{-6}/h$  und  
für Regelventile zwischen  $12$  und  $41 \cdot 10^{-6}/h$ .

---

<sup>1</sup> Hantke Energietechnik (HET), Fürstenfeldbruck

<sup>2</sup> KFA - ISF

## VORWORT

Zur Durchführung von probabilistischen Analysen ist die Kenntnis der Zuverlässigkeitskenngrößen der in den analysierten Systemen eingesetzten Komponenten zwingend erforderlich. Diese Zuverlässigkeitskenngrößen müssen durch statistische Auswertung des beim Betrieb solcher Komponenten beobachteten Ausfallverhaltens ermittelt werden. Dabei ist man in der Regel auf Beobachtungen *ähnlicher* Komponenten, die unter *vergleichbaren* Bedingungen betrieben wurden, angewiesen.

Für Komponenten in Gaskreisläufen von Hochtemperaturreaktoren (HTR) gab es bisher solche Kenngrößen noch nicht. Im Interesse der Belastbarkeit von Zuverlässigkeitsaussagen für HTR war es daher erforderlich, alle zur Verfügung stehenden Betriebserfahrungen mit solchen Gaskreislauf - Komponenten auszuwerten. Zur Verfügung standen bisher im wesentlichen die Betriebserfahrungen der Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor (AVR). Die Ergebnisse dieser Auswertung sind in den beiden Bänden des vorliegenden Berichts dokumentiert.

Ein besonderer Dank gilt an dieser Stelle den Mitarbeitern der Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor (AVR), an erster Stelle Herrn Ziermann und Herrn Wahlen, die freundlicherweise die Betriebsunterlagen zugänglich gemacht und die Auswertung fachkundig verfolgt haben.

Die beiden Bände setzen je unterschiedliche Schwerpunkte:

Band I setzt zunächst die Zeitkonstanz der Ausfallraten voraus. Darauf aufbauend wird untersucht, ob eine Abhängigkeit der Ausfallrate vom Kreislauf, vom Einbauort, von der Schaltzahl oder von der Umgebungstemperatur festgestellt werden kann. Ergänzend wird die Abhängigkeit der Ausfallraten vom Betriebsjahr untersucht. Mögliche technische Ursachen für Häufungen von Ausfällen bei bestimmten Komponenten werden diskutiert.

Band II läßt grundsätzlich eine Zeitabhängigkeit der Ausfallraten zu. Die Lebensdauerverteilungen werden ermittelt. Die Anteile der verschiedenen Ausfallursachen werden angegeben. Weiterhin wird untersucht, welche Ergebnisse mit fortgeschrittenen statistischen Methoden erzielt werden können.

Die Auswertung wird mit den beim THTR-300 gewonnenen Erfahrungen fortgesetzt, diese Ergebnisse sollen in einem späteren Bericht veröffentlicht werden.

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. Zusammenfassung	1
2. Einleitung	2
3. Erfassung von Ausfällen, Definitionen	4
4. Ergebnisse	8
4.1 Zeitliche Abhängigkeit der Armaturenausfälle	8
4.2 Abhängigkeit der Armaturenausfälle von der Schalthäufigkeit	10
4.3 Abhängigkeit der Ausfälle von Kreislauf und Armaturentyp	12
4.4 Abhängigkeit der Ausfälle vom Aufstellungsort	17
4.5 Mögliche Temperaturabhängigkeit der Ausfallraten	19
4.5.1 Auswahl der Temperaturmeßmethode und der zu messenden Ventile	19
4.5.2 Meßergebnisse	22
4.5.3 Auswertung	23
5. Schlußfolgerungen	25
6. Abbildungen und Tabellen	27

## 1. Zusammenfassung

Für eine sicherheitstechnische Analyse mit Hilfe von Fehlerbäumen und Ereignisablaufdiagrammen ist die Kenntnis von statistischen Ausfallkennwerten der Komponenten, die in einem System oder Kreislauf eingebaut sind, erforderlich. Bei Hochtemperaturkernkraftwerken lagen bisher keine aus dem Betrieb gewonnenen statistischen Daten vor. Stattdessen konnte nur auf Angaben von konventionellen Anlagen und von Wasserreaktoren zurückgegriffen werden.

Aus diesem Grunde sollten entsprechende Werte aus dem Betrieb des Versuchskernkraftwerks der AVR ermittelt werden. Im vorliegenden Bericht werden die hieraus gewonnenen Daten der Ausfallraten von Armaturen in Gaskreisläufen dargestellt.

Danach wurde für die Betriebszeit von 1970 bis 1984 eine mittlere Ausfallrate aller Ventile von  $3,5 \cdot 10^{-3}/h$  ermittelt. Sie liegt für Handarmaturen bei  $0,5 \cdot 10^{-3}/h$ , bei pneumatischen Armaturen zwischen  $3$  und  $9 \cdot 10^{-3}/h$ , für Magnetarmaturen zwischen  $1,5$  und  $4 \cdot 10^{-3}/h$  und für Regelventile zwischen  $12$  und  $41 \cdot 10^{-3}/h$ .

Es wurden Ursachen für eine mögliche Beeinflussung der Ausfallraten untersucht. Hierbei konnte weder eine statistisch signifikante Abhängigkeit der Ausfallraten von dem Einbauort, der Umgebungs- und Betriebstemperatur noch von dem Kreislauf, in dem die Armaturen eingebaut waren, festgestellt werden. Da die Schaltzahl nur in vereinzelten Fällen abgeschätzt werden konnte, war keine entsprechende Abhängigkeit herzuleiten. Nur bei Einsätzen in Kreisläufen zur Zweipunktregelung, wo Betätigungen von über 150000/a vorkamen, traten verstärkt Ausfälle auf.



## 2.) Einleitung

Eine Möglichkeit zur Beurteilung der Sicherheit von verfahrenstechnischen Großanlagen wie z.B. Kernkraftwerke stellt die Betrachtung der Betriebserfahrung vorhandener Anlagen und die Analyse der eingetretenen Störfälle dar. Die Sicherheitsanforderungen an kerntechnische Anlagen sind jedoch so hoch, daß derartige Ereignisse nur selten oder gar nicht eintreten. Daher ist die Anzahl solcher Vorkommnisse für eine statistische Analyse und eine Vorhersage der Wahrscheinlichkeit ihres zukünftigen Auftretens nicht ausreichend.

Aus diesem Grunde wird die Eintrittswahrscheinlichkeit von Störfällen und Unfällen an Kernkraftwerken nach analytischen Methoden bestimmt. Hierbei wird die Ausfallhäufigkeit komplexer Systeme durch logische Verknüpfungen von bekannten Zuverlässigkeitskennwerten der Komponenten oder Bauteile, aus denen sie sich zusammensetzen, ermittelt. Diese Zuverlässigkeitskennwerte können aus Ausfallstatistiken von Bauteilen in Kernkraftwerken oder in anderen verfahrenstechnischen Anlagen oder durch Versuche hergeleitet werden und stehen daher eher zur Verfügung.

Voraussetzung für dieses Vorgehen ist eine Vergleichbarkeit der Bauteile selbst und der Betriebsbedingungen, unter denen die Zuverlässigkeitskennwerte gewonnen wurden, mit den Einsatzbedingungen in dem zu analysierenden System. Wegen des Fehlens von Zuverlässigkeitskennwerten für HTR-spezifische Komponenten wie Gebläse, Gasarmaturen usw. wurde bisher bei der probabilistischen Sicherheitsanalyse von Hochtemperaturreaktoren z.B. auf Ausfalldaten von Wasserreaktoren zurückgegriffen. Die Übertragbarkeit derartiger Daten ist jedoch wegen anderer Betriebsbedingungen, anderer Anforderungen und auch unterschiedlichem Aufbau der Bauteile problematisch.

Eine andere Quelle für Ausfallkennwerte von HTR-spezifischen Komponenten stellen Betriebserfahrungen der bisher betriebenen HTR-Kernkraftwerke dar. Der Betrieb dieser Versuchsanlagen wurde nicht unter dem Gesichtspunkt einer Erfassung von statistischen Ausfalldaten geführt. Eine erste Überprüfung ergab jedoch, daß sich mit gewissen Einschränkungen, auf die im Laufe der Ausführungen noch eingegangen wird, aus den Betriebsunterlagen des Versuchskernkraftwerks der Arbeitsgemeinschaft-Versuchsreaktor GmbH (AVR) Aussagen über z.B. Verfügbarkeit der Beschickungsanlage und die Ausfallrate von Armaturen herleiten lassen. Der vorliegende Bericht gibt die so gewonnenen Ergebnisse für Armaturen von Gaskreisläufen wieder.

### 3. Erfassung von Ausfällen, Definitionen

Es gibt eine Vielzahl von Vorschlägen zur Erfassung und Analyse von statistischen Ausfalldaten in Kraftwerken (z.B. VGB, RWE) und in Kernkraftwerken (z.B. GRS A-532, GRS A-744). Eine vollständige Erfüllung setzt einen beachtlichen Aufwand voraus und, was im Fall des Versuchskernkraftwerks der AVR (im folgenden nur noch "AVR" genannt) nicht mehr möglich war, die Einführung eines entsprechenden Systems zur Erfassung und vollständigen Verfolgung derartiger Ausfälle oder Störungen.

Aufzeichnungen erfolgten beim AVR im wesentlichen mit dem Ziel, eine sichere Betriebsführung zu gewährleisten. Trotzdem konnten die für eine statistische Auswertung wichtigen Ereignisse erfaßt werden. Als Quelle dieser Daten dienten neben persönlichen Diskussionen mit den Komponentenverantwortlichen die folgenden Betriebsaufzeichnungen:

1. Wartungsbücher
2. Schutzbehälterkontrollbücher
3. Arbeitssicherungsscheine
4. Aktennotizen über Arbeiten während Abschaltphasen
5. Liste von durchgeführten Wartungs- und Reparaturarbeiten
6. Quartalsberichte
7. Betriebsberichte
8. Armaturenlisten.

Schwierig gestaltete sich die Beurteilung von Aufschreibungen. Da die Betriebsunterlagen zum Teil nur als Information für die Folgeschicht oder die Wartungsabteilung über aufgetretene Abweichungen vom Normalverhalten dienten und nicht unter dem Gesichtspunkt des Aufstellens einer Schadensstatistik geführt wurden, ging aus den Aufschreibungen bisweilen nicht

eindeutig hervor, ob es sich um einen Ausfall handelte, ob eine Reparatur und welche erforderlich war, wie lange der Ausfall dauerte und was die Ursache war.

Bisweilen tauchte eine Meldung z.B. im Wartungsbuch über einen nicht befolgten Schaltbefehl durch eine Armatur auf. Aus anderen Unterlagen ließ sich jedoch herleiten, daß dieselbe Armatur später - offensichtlich ohne vorangegangene Reparatur - wieder einwandfrei schaltete. Ursache hierfür konnte z.B. ein temporäres Festsitzen der Armatur sein mit der Folge, daß das Losbrechmoment des Stellantriebes gerade nicht ausreichte. Es konnte sich auch ein Schmutzpartikel zwischen Führung und Plunger einer Magnetarmatur gesetzt haben, das eine einwandfreie Schaltung verhinderte. Ein späterer Schaltbefehl oder mehrmaliges Schalten konnte wieder zu einer einwandfreien Funktion führen. Ein Arbeitssicherungsschein wurde daher in einem solchen Fall nicht ausgestellt. Da jedoch jeder Erwähnung in den Unterlagen ein "Funktionsversagen" vorangegangen sein mußte, wurde jede derartige Abweichung vom normalen Verhalten als "Ausfall" gewertet. Desgleichen wurden auch vorsorgliche Austauschmaßnahmen als Störungen aufgenommen, da aus den Unterlagen nicht eindeutig hervorging, ob nicht doch eine Fehlfunktion der betreffenden Armatur aufgetreten war. Dasselbe galt auch für die Fälle, bei denen aus den Aufschreibungen nur hervorging, daß eine Armatur "kontrolliert" wurde.

Wie bereits oben erwähnt, konnte in den meisten Fällen die Ausfallursache den Unterlagen nicht entnommen werden. Dies galt nicht für die erfaßten Sicherheitsventile. Bei diesen Ventilen handelte es sich um Folien-Sicherheitsventile, bei denen wegen der hohen Dichtigkeitsanforderungen an die Gaskreisläufe eine Folie als zusätzlicher Abschluß gegen außen eingebaut war. Sprach ein Sicherheitsventil wegen Überdruck - funktionsrichtig - an, wurde diese Armatur undicht, was im He-Überwachungssystem

sofort gemeldet wurde. Da damit aber die Dichtfunktion nicht mehr gegeben war, wurde auch dieses Ansprechen als "Ausfall" registriert. Aus den dargestellten Gründen ist zu erwarten, daß die ermittelten Ausfalldaten konservativ sind.

Sofern eine Armatur z.B. sowohl im Wartungsbuch als auch in einem Arbeitssicherungsschein innerhalb einiger Tage gleichzeitig erwähnt wurde, wurde dies nur als ein Ereignis aufgenommen.

Bei pneumatischen Armaturen (Armaturen mit pneumatischem Antrieb) mußte jeder Ausfall einzeln betrachtet werden, da z.T. Ausfälle der Vorsteuerarmatur nicht als solche sogleich erkannt wurden, sondern der Hauptarmatur zugeschrieben wurden. Dies wurde in der Statistik entsprechend korrigiert.

Wenn in den folgenden Auswertungen nicht anders aufgeführt, wird unter "Armatur" gemäß GRS A-744 das "Aggregat" verstanden, bestehend aus dem "Betriebsmittel" Ventil (Ventilkörper, Plunger und Stellungsgeber) und dem Betriebsmittel Antrieb. Steuerungsausfälle wurden nicht aufgenommen, es sei denn, es handelte sich um Ausfälle der zugehörigen magnetischen Vorsteuerarmaturen, die dann dem Aggregat "magnetische Armatur" im Steuergaskreislauf zugeschrieben wurden. Auch bei den magnetischen Armaturen wurden Ausfälle der zugehörigen elektrischen Steuerung nicht aufgenommen. Zur Verdeutlichung dieser Erfassungsgrenzen sind in Abb.1 beispielhaft magnetische, pneumatische und Motorarmaturen schematisch dargestellt. Da jedoch nicht immer eindeutig die Störungsursache den Aufschreibungen entnommen werden konnte, kann es sein, daß teilweise auch Steuerungsausfälle den Armaturen angelastet wurden. Daher ist auch von dieser Seite anzunehmen, daß die Ausfälle der Armaturen konservativ abgeschätzt wurden.

Zur Bestimmung der Grundgesamtheit oder "Population" der betrachteten Armaturen wurden die Armaturenlisten herangezogen. Je nach der Unterteilung in den Auswertungen wird dann als Population z.B die Gesamtheit aller Armaturen in einem Kreislauf, der Magnetarmaturen in allen Kreisläufen, der pneumatischen Armaturen eines Typs in einem speziellen Kreislauf usw. bezeichnet.

Die Anzahl der Armaturen änderte sich z.T. bei den verschiedenen Kreisläufen mit der Zeit geringfügig aufgrund von systemtechnischen Änderungen. Entsprechende Angaben wurden dann in der Population berücksichtigt.

Als Auswertungszeitraum wurde die Zeit von 1970 - 1984 (15 Jahre) angesetzt. Aus den Tabellen 1 und 2 ließe sich u.a. eine mögliche zeitliche Abhängigkeit herleiten. Wie hierzu im Kapitel 4.1 beschrieben, konnte wegen der großen Streuung der Ausfallraten pro Jahr keine altersbedingte systematische Änderung der Ausfallraten mit der Zeit abgeleitet werden. Aus diesem Grunde wurde von einer konstanten Ausfallrate ausgegangen, und es wurde nur die mittlere Ausfallrate bestimmt. Die Annahme einer konstanten Ausfallrate scheint auch deswegen gerechtfertigt, da Armaturen innerhalb des Systems umgangen werden konnten und daher erforderliche Reparaturen erst in einer Abschaltpause durchgeführt wurden. Für eine Bestimmung einer Zeitabhängigkeit der Lebensdauer von Armaturen wäre auch eine genaue Erfassung des Ausfallzeitpunktes wünschenswert. Dies war nur in den seltensten Fällen möglich, da eine Funktionsuntüchtigkeit meistens erst mit dem Versuch einer Betätigung entdeckt wurde.

Im Anschluß an eine Reparatur oder Inspektion usw. wurde die Armatur als "wie neu" gewertet. Die Ausfallzeit wurde als klein gegenüber der Betriebszeit angesetzt. Als Bezugszeit wurde grundsätzlich die Kalenderzeit herangezogen. Dies geschah, da auch in den Abschaltzeiten die Gaskreisläufe zum größten Teil weiter betrieben wurden.

#### 4. Ergebnisse

##### 4.1 Zeitliche Abhängigkeit der Armaturenausfälle

In Tabelle 1 und Abbildung 2 sind alle betrachteten Kreisläufe, Armaturen und "Armaturenereignisse" zusammengefaßt dargestellt. (Wie in Kapitel 3 ausgeführt, werden im folgenden diese Ereignisse als faktische Ausfälle gewertet). Spalten und Zeilen der Tabelle 1 bedeuten im einzelnen:

Spalte 1, betrachtete Kreisläufe:

W 1	=	Primärgaskreislauf
W 3	=	Gasreinigungssystem
W 4a	=	Sperrgas 1 - Kühlgasgebläse
W 4b	=	Sperrgas 1 - Kreislauf
W 4c	=	Spülgas
W 5	=	Sperrgas 2 - Kreisläufe
W 6b	=	Steuergas
W 12	=	Reingaskreislauf
W 19b	=	Steuerluft

Spalte 2 = zugrunde gelegte Population aller Armaturen des betreffenden Kreislaufts

Spalten 3 bis 17 = Ausfallraten der Armaturen des Kreislaufts im betreffenden Jahr

Spalte 18 = Summe aller Ausfälle in den 15 Jahren im betrachteten Kreislauf

Spalte 18a = Zugehörige mittlere Ausfallrate pro Stunde

Vorletzte Zeile = Summe der Ausfälle im betrachteten Jahr

Letzte Zeile = Mittlere Ausfallrate pro Stunde im betrachteten Jahr

Auffällig ist die große Abweichung der mittleren Ausfallraten von einander in den verschiedenen Kreisläufen und Jahren. Offensichtlich handelt es sich hierbei um nicht vergleichbare Kollektive. Für die großen Abweichungen der Ausfallraten im Jahr 1970 ließ sich leicht eine Erklärung finden: So zeigte eine Analyse der Ausfallursachen, daß im Jahr 1969 und 1970 eine Austauschaktion von Magnetspulen für einen speziellen Typ von Armaturen durchgeführt wurde, da die eingebauten Spulen den Temperaturbedingungen im Schutzbehälter nicht gewachsen waren. Die so ausgetauschten Armaturen wurden im Folgenden außer Betracht gelassen. Das Ergebnis ohne diesen Spulenwechsel ist in Tabelle 2 und Abbildung 3 wiedergegeben.

Unterstellt man, daß 1970, d.h. ein Jahr nach der Übernahme durch den Betreiber, noch "Kinderkrankheiten" beseitigt wurden, scheinen die Ausfallraten in den verschiedenen Jahren bis auf das Jahr 1977 (Spalte 10) innerhalb akzeptabler Streuungen zu liegen.

Eine Korrelation der Ausfallraten mit der Jahresverfügbarkeit des Kernkraftwerks konnte ebenfalls nicht festgestellt werden. (S. Abbildung 4). Stattdessen hat die relativ große Zunahme der Ausfälle in 1977 (insbesondere Kreisläufe W3, W4b, W4c) ihre Ursache offensichtlich in den zu diesem Zeitpunkt durchgeführten Wiederkehrenden Prüfungen der Gaskreislaufbehälter.

Unabhängig hiervon scheint die Tabelle 2 darauf hinzuweisen, daß bezogen auf die Ausfallraten in den verschiedenen Kreisläufen unterschiedliche Kollektive miteinander verglichen werden. Die Ursachen hierfür könnten z.B. sein:

- unterschiedliche Belastungen der Armaturen in den Kreisläufen,
- unterschiedliche Anzahl von Armaturentypen mit unterschiedlicher Ausfallrate in den jeweiligen Kreisläufen,
- unterschiedliche Umgebungsbelastung.

Diese Einflüsse auf die gefundenen Ausfallraten der Armaturen werden in den folgenden Kapiteln untersucht.



#### 4.2 Abhängigkeit der Armaturenausfälle von der Schalthäufigkeit

Eine genaue Feststellung der Schalthäufigkeit von Armaturen ist beim AVR praktisch nicht möglich. In einigen Bereichen kann eine grobe Abschätzung weiterhelfen. Hierzu gehören z.B. :

- Gasarmaturen, die für Ein- und Ausschleusen von Kugelelementen betätigt werden;
- Armaturen im Bereich der Gasreinigungsanlage, deren Umschaltung bei Übergang von Reinigungs- in Regenerierbetrieb erforderlich ist;
- Armaturen, die zur Zweipunkt-Druckregelung eingesetzt wurden.

Eine Zuordnung der Ausfälle zur Anzahl der Betätigungen von Gasarmaturen für das Spülen der Schleusen in der Beschickungsanlage ist in Tabelle 3 wiedergegeben. Zur Feststellung der Anzahl von Schaltungen dieser Armaturen während des Ein- und Ausschleusens von Kugeln wurde die Schaltfolge der Zugabe- und Entnahmestrecke der Beschickungsanlage herangezogen. In der Zeit von 1970 bis 1975 erfolgte das Ein- und Ausschleusen von Kugeln in Zehnergruppen. Ab April wurden die Kugeln nur noch in Fünferpaketen eingeschleust. Hieraus und aus der Zahl der ein- und ausgeschleusten Kugeln ergeben sich die in Tabelle 3, Spalte 3 angegebenen Zahlen. In Spalte 4 ist die registrierte Anzahl der Ausfälle der betreffenden Armatur aufgeführt. Als Ergebnis kann festgehalten werden, daß bei der hier vorliegenden Anzahl von Schaltungen offensichtlich keine Korrelation mit der Ausfallhäufigkeit hergeleitet werden kann.

Die Umschalthäufigkeit der beiden beim AVR vorhandenen parallelen Gasreinigungsanlagen von Reinigungsbetrieb in Regenerier- bzw. "Stand-by"-Betrieb hängt von der Höhe der Gasverunreinigungen ab. Sie beträgt Wochen bis Monate. Dies bedeutet eine Betätigungszahl der betreffenden Armaturen, die

um mehr als eine Größenordnung geringer ist als bei den oben betrachteten Gasarmaturen für das Ein- und Ausschleusen von Kugelelementen. Aus diesem Grunde ist in diesem Bereich erst recht keine Abhängigkeit von der Schaltzahl zu erwarten.

Bei der Ausfallanalyse wurde u.a. eine Häufung von Mehrfachausfällen an den Armaturen festgestellt, die zur Druckregelung eingesetzt wurden (s. Tabelle 4). Hierbei handelte es sich um Auf/ Zuregelungen, wo die Schalthäufigkeit von der Einstellung der Gesamtregelstrecke abhängt. Verschiedentlich konnte festgestellt werden, daß deren Schalthäufigkeit mehrere Auf/Zuschaltungen pro Minute betrug. Da sich in den Regelstrecken 4 Armaturen befanden, wurden die in der Tabelle 4 angegebenen Schaltraten abgeschätzt. Hieraus ergeben sich in den betrachteten 15 Jahren Schaltzahlen, die bis zu 2 Größenordnungen über den Betätigungen der Schleusenarmaturen in Tabelle 3 liegen. Das heißt, daß hier eine Abhängigkeit der Ausfallrate von der Betätigungszahl vorliegen könnte. Genauere Aussagen sind jedoch wegen fehlenden exakten Angaben über Schalthäufigkeiten nicht möglich.

#### 4.3 Abhängigkeit der Ausfälle von Kreislauf und Armaturentyp

Die betrachtete Gesamtheit aller Armaturen von ca. 2300 Stück setzte sich aus über 70 unterschiedlichen Typen zusammen, wobei diese sich durch den Antrieb, Abmessungen, Hersteller, Werkstoff usw. unterschieden. Um für die statistische Auswertung größere Bezugseinheiten zu erhalten, wurden die Armaturen, die dieselben Antriebe hatten und vom selben Hersteller kamen sowie ähnliche Abmessungen und Betriebsbedingungen hatten, in Gruppen zusammengefaßt. Einzelne Armaturen, die sich wegen größerer Abweichungen von den charakteristischen Gruppenmerkmalen nicht einordnen ließen, blieben außerhalb der weiteren Betrachtung. Insgesamt wurden so 16 Gruppen gebildet:

- 4 Magnetventilgruppen
- 2 Gruppen mit pneumatischem Antrieb und Steuermedium Luft
- 1 Gruppe mit pneumatischem Antrieb und Steuermedium anfänglich Helium, später Stickstoff
- 6 Handarmaturengruppen
- 1 Gruppe Regelventile mit pneumatischem Antrieb
- 1 Gruppe Motorregelventile
- 1 Gruppe Sicherheitsventile

Die Untergruppen der verschiedenen Typen sind durch unterschiedliche Hersteller bedingt (mit Ausnahme von Magnet C1 und C2, die denselben Lieferanten besitzen, die sich jedoch im Aufbau unterscheiden).

In Tabelle 5 sind die Verteilungen dieser Armaturen auf die Kreisläufe und die Anzahl ihrer Ausfälle in den 15 Betriebsjahren aufgeführt. Tabelle 6 zeigt die entsprechenden mittleren Ausfallraten pro Betriebsstunde.

Betrachtet man - ohne Rücksicht auf den Kreislauf - die Ausfallraten der verschiedenen Armaturen, so fällt folgendes sofort auf:

- eine relativ hohe Ausfallrate der Regelarmaturen und der Sicherheitsventile,
- eine um fast 2 Größenordnungen niedrigere Ausfallrate von Handarmaturen,
- dazwischen liegende Ausfallraten von Magnet- bzw. Pneumatikarmaturen.

Die niedrige Ausfallrate der Handarmaturen beruht zum Teil, wie bereits in Kapitel 2 erwähnt, darauf, daß ein möglicher Ausfall erst nach einer Betätigung festgestellt werden kann, und die Handarmaturen wurden nur selten betätigt.

Bei den Angaben zu den Sicherheitsventilen muß berücksichtigt werden, daß sie bei Anforderung immer angesprochen haben und die "Ausfälle" den Austausch der Dichtungsfolien bedeuten.

Inwieweit ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Ausfallraten der Magnet- und Pneumatikarmaturen vorliegt, soll in den folgenden Untersuchungen überprüft werden. Außerdem soll abgeschätzt werden, ob die Ausfallraten der einzelnen Armatur von eventuellen speziellen Belastungen durch den Kreislaufs, in den sie eingebaut sind, abhängen.

Unterstellt man eine Veränderung der Ausfallhäufigkeit der Armaturen durch die zwei Faktoren : Art der Armatur und Kreislaufbelastung, so wäre prinzipiell eine Untersuchung nach einer zweifaktoriellen Varianzanalyse in Erwägung zu ziehen. Diese setzt jedoch im Normalfall voraus, daß der Stichprobenumfang für alle Stichproben gleich ist (balanziert). Andernfalls wird die Auswertung erschwert. Eine saubere Trennung der Effekte, die durch die einzelnen Faktoren bzw. Wechselwirkungen hervorgerufen werden, ist nicht möglich.

Aus den Tabellen 5 und 6 sieht man, daß die Zahl der verschiedenen Armaturen in den einzelnen Kreisläufen sehr unterschiedlich ist. Aus diesem

Grunde kann von balanzierten Stichproben nicht ausgegangen werden. Eine Normierung auf eine gleiche Armaturenanzahl würde die Statistik völlig verfälschen. Aus diesem Grunde wurde versucht, auf eine andere Weise Abhängigkeiten zumindestens angenähert festzustellen. Hierzu wurde der  $\chi^2$ - (Chi-Quadrat) Anpassungstest herangezogen.

Mit Hilfe der Prüfgröße  $\chi^2$  können nominalskalierte Häufigkeitsverteilungen verglichen werden. Hiermit wird getestet, ob die theoretisch erwartete Häufigkeitsverteilung mit der gemessenen so weit übereinstimmt, daß auf einem vorgegebenen Signifikanzniveau die Übereinstimmung nicht abgelehnt werden muß. Hierfür wird der Erwartungswert " $E_i$ " mit dem Meßwert " $B_i$ " verglichen. Mit Hilfe der Rechenvorschrift:

$$\chi^2(\text{gem.}) = \text{Summe} \{ (B_i - E_i)^2 / E_i \} \quad (1)$$

wobei über alle  $i$  Wertepaare summiert wird, erhält man einen Wert, der mit dem zugehörigen, tabellierten  $\chi^2(n; x\%)$ -Wert überprüft wird. Hierbei bedeuten  $n$  die Anzahl der Freiheitsgrade und  $x$  das vorher festgelegte Signifikanzniveau der Annahme bzw. Ablehnung der "Nullhypothese", d.h. der erwarteten Verteilung.

Das Signifikanzniveau wird auf 95% festgelegt; d.h. ist der gemessene  $\chi^2$ -Wert kleiner als der tabellierte, so wird eine Übereinstimmung der gemessenen mit der erwarteten Verteilung nicht ausgeschlossen.

Als "Erwartungsverteilung" wird angenommen, daß die Ausfallraten der Armaturen nicht vom Einsatz in den Kreisläufen und die mittleren Ausfallraten in den Kreisläufen nicht von der Zahl der eingesetzten unterschiedlichen Armaturen abhängen.

Für die Auswertung wurden alle Magnetarmaturen, pneumatische Armaturen und Handarmaturen in jeweils eine Gruppe zusammengefaßt (Tabelle 7). Außerdem

wurden der Magnetspulenaustausch im Jahr 1970 und die vorn erwähnten Armaturen, die durch Einsatz in den Zweipunktregelstrecken und in der Umgebung der Membrankompressoren MK6a und MK6b außergewöhnlich belastet wurden, nicht berücksichtigt. Hierdurch sollte verhindert werden, daß die Ergebnisse dieses Tests durch bereits bekannte, ungewöhnliche Ausfälle verfälscht werden. Im einzelnen bedeuten :

die Spaltenbezeichnungen: Z = Anzahl der Armaturen, A = Anzahl der Ausfallereignisse, E:W = Erwartungswert der Ausfälle unter der Annahme einer nur durch den Kreislauf und nicht durch unterschiedliche Armaturen bestimmten mittleren Armaturenausfallrate,  $\chi^2:W$  = Vergleichswert mit der mittleren Ausfallrate des betreffenden Kreislaufs, E = Erwartungswert bei einer kreislaufunabhängigen Ausfallrate und  $\chi^2$  der zugehörige Vergleichswert, der in der vorletzten Spalte aufsummiert wurde und vor dem Tabellenwert steht;

die Zeilenbezeichnungen:  $\chi^2$  gemessen = gemäß Gleichung (1) ausgerechneter Summenwert,  $\chi^2(n, 95\%)$  ( $n=1$  oder  $2$ ) = Tabellenwert des Freiheitsgrades 1 bzw. 2 und  $\chi^2$  ohne Handarmatur = die entsprechenden Zahlen unter Berücksichtigung nur von Magnet- und Pneumatikarmaturen.

Die Vergleiche zeigen, daß alle mittleren Ausfallraten der Kreisläufe von der Anzahl unterschiedlicher Armaturen, insbesondere Handarmaturen abhängen. Schließt man die Handarmaturen von dem Vergleich aus, so sind die Abweichungen der  $\chi^2$ -Werte mit Ausnahme bei den Kreisläufen W6b und W19b so groß, daß von einer statistisch gesicherten Abhängigkeit der mittleren Ausfallraten in den Kreisläufen von der Anzahl verwendeter Pneumatik- bzw. Magnetarmaturen ausgegangen werden kann. Daß bei den Kreisläufen W6b und W19b keine derartige Abweichung gefunden wird, liegt offensichtlich an der bestimmend großen Anzahl von Magnetarmaturen in diesen Kreisläufen.

Der Chi<sup>2</sup>-Anpassungstest für die unterschiedlichen Armaturen (waagerechter Vergleich in Tabelle 7) zeigt zwar geringere Abweichungen der beiden  $\chi^2$ -Werte als für die Kreisläufe, aber auf dem 95%-Signifikanzniveau kann insbesondere für die magnetischen und pneumatischen Armaturen keine zuverlässige Aussage gemacht werden. Den Hauptbeitrag liefern die Abweichungen im Kreislauf W5. Schließt man diesen aus, so lauten die entsprechenden Werte:

$\chi^2$ -Magnetarmaturen(gemessen):7,34 ; ( 4,95% ):9,49  
 $\chi^2$ -Pneumatikarmat(gemessen): 7,91 ; ( 4,95% ):9,49

Das heißt, es kann eine Unabhängigkeit der Ausfallraten von magnetischen und pneumatischen Armaturen von den Kreisläufen, in denen sie eingesetzt sind, angenommen werden.

#### 4.4 Abhängigkeit der Ausfälle vom Aufstellungsort

In den bisherigen Überlegungen wurde eine zeitunabhängige Ausfallrate angenommen. Sind keine weiteren besonderen Beeinflussungen vorhanden, so müßte die Anzahl der Ausfälle pro Armatur in dem betrachteten Zeitraum von 15 Jahren einer Poissonverteilung entsprechen. Abweichungen müßten auf eine besondere Belastung hinweisen.

Bei einer Vorauswertung wurde festgestellt, daß im Bereich der Membrankompressoren MK 6a und MK 6b 9 Armaturen insgesamt 49-mal ausfielen. Diese Abweichung vom statistischen Mittel ist signifikant und könnte auf eine Abhängigkeit vom Einbauort hindeuten. Um eine derartige Abhängigkeit nachzuweisen, wurden die Ausfallhäufigkeiten von Armaturen in Abhängigkeit von den Aufstellungsorten analysiert.

In Tabelle 8 sind für die Armaturen des Kreislaufs W19b (Vorsteuerluft) und für die durch sie angesteuerten pneumatischen Armaturen die Ausfälle auf den verschiedenen Bühnenhöhen dargestellt. Hierbei wurden Einfach- und Mehrfachausfälle getrennt aufgeführt. Diese Ausfälle müßten mit einer Poissonverteilung übereinstimmen. In Tabelle 9 ist beispielsweise die entsprechende Analyse für die Armaturen des Kreislaufs W19b wiedergegeben. In der zweiten Spalte der jeweiligen Bühnenunterteilung sind die einer Poissonverteilung entsprechenden Ausfallzahlen angegeben. In der Zeile "Armaturenzahl" ist die mittlere Ausfallrate (in 15 Jahren) für diese Bühne aufgeführt. In der letzten Zeile stehen die errechneten  $\chi^2$ -Vergleichswerte.

Außer auf den Bühnen 25,5m und 11,6m entspricht die Verteilung der Ausfallhäufigkeiten einer Poissonverteilung. Die Abweichungen auf der Bühne 25.5m werden durch die gegenüber der Poissonverteilung häufigeren "Einfach"-Ausfälle hervorgerufen. Dies kann mit dem Austausch der Magnetspulen im Jahr 1970 erklärt werden. Auf Bühne 11,6m führen die Mehrfachausfälle von 3 Armaturen (13 Ausfälle) zur Ablehnung der Nullhypothese. Aus Tabelle 8 kann



man entnehmen, daß diese 3 Armaturen mit den 13 Ausfällen in demselben Stahlgerüst 14 montiert sind. Sie steuern jeweils pneumatische Armaturen, die in unterschiedlichen Kreisläufen eingesetzt sind. Eine Beeinflussung durch einen Kreislauf läßt sich daher nicht herleiten.

Als Nächstes wurde die Nullhypothese aufgestellt, daß keine Abhängigkeit der mittleren Ausfallraten von den Bühnen existiert. Es wurden die mittleren Ausfallraten auf den verschiedenen Bühnen mittels  $\chi^2(5;95\%)$ -Test überprüft. Als Ergebnis stellte sich heraus, daß die Abweichung zu groß ist und auf diesem Signifikanzniveau die Annahme einer Bühnenunabhängigkeit abgelehnt werden muß.

Entsprechende Untersuchungen wurden für die Steuerventile des Kreislaufs W6b durchgeführt. Danach entsprachen die Ausfallverteilungen einer Poissonverteilung und eine Bühnenunabhängigkeit konnte nicht bestätigt werden.

Bei Anwendung des  $\chi^2$ -Tests zur Untersuchung einer möglichen Bühnenunabhängigkeit der pneumatischen Armaturen mußte diese ebenfalls abgelehnt werden. Die Aussagegenauigkeit ist jedoch durch die große Streuung der Ausfallraten in den verschiedenen Bühnen beeinträchtigt. So wurde festgestellt, daß die Ausfallhäufigkeitsverteilung auf Bühne 21m und 11,6m von einer Poissonverteilung signifikant abweicht.

Mögliche Faktoren, die auf die Armaturen örtlich unterschiedlich einwirken sind z.B. Bestrahlungsdosisleistung und Temperaturen. Die auf die Armaturen einwirkende Neutronen- bzw.  $\gamma$ -Strahlung ist jedoch so gering, daß eine Materialänderung und damit eine Funktionsbeeinträchtigung hierdurch nicht zu erwarten ist. Eine andere Möglichkeit einer örtlichen Beeinflussung der Ausfallhäufigkeit einer Armatur könnte von einer unterschiedlichen Temperatur herrühren. Die entsprechenden Untersuchungen werden im folgenden Abschnitt dargestellt.

## 4.5 Mögliche Temperaturabhängigkeit der Ausfallraten

### 4.5.1 Auswahl der Temperaturmeßmethode und der zu messenden Ventile

Eine erste Annäherung an die Temperaturbelastung stellt die Umgebungstemperatur auf den Bühnen dar. Diese kann mit fest installierten Meßgeräten erfaßt werden. Gleichzeitig kann davon ausgegangen werden, daß dies die Minimaltemperaturen der Ventile ist, die nicht in den isolierten, abgeschlossenen Räumen installiert sind. Eine Messung der Armaturen in solchen abgeschlossenen Räumen schied wegen des erforderlichen Aufwands für eine Messung von vornherein aus. Da jedoch die wenigsten Ventile in derartigen isolierten Bereichen installiert sind und die meisten Ausfälle in nichtisolierten Bereichen stattfanden, bedeutet die Untersuchung der Temperaturen nur dieser Ventile keine Einschränkung der allgemeinen Gültigkeit.

Als für die thermische Belastung der Ventile maßgeblichen Stellen wurden die Temperaturen der Dichtflächen und der Antriebe angesehen. Da - wie oben erwähnt - Messungen nur in nichtisolierten Räumen stattfinden konnten, wurde davon ausgegangen, daß die Temperaturen des Steuergases und des gesteuerten Mediums der Raumtemperatur entsprach. Aus diesem Grunde wurde bei den pneumatischen Armaturen die Temperatur der Steuerzylinder, bei den Magnetventilen die der Magnethauben gemessen.

Die Temperaturbestimmung sollte einfach sein, keine große Kosten verursachen und in einer statistisch auswertbaren Anzahl durchgeführt werden. Hierfür schien die Messung der betrieblichen Maximaltemperatur geeignet. Aus diesem Grunde wurden zur Temperaturbestimmung Meßstreifen gewählt, die die höchste während der Verweildauer erreichte Temperatur festhalten. (S.Abb.7).

Aufgrund der Raumtemperaturen wurden Temperaturmeßstreifen mit 4 Meßbereichen und den folgenden Temperaturstufungen gewählt :

- Meßbereich I = 37, 40, 43, 46, 49, 54, 60, 65°C
- Meßbereich II = 60, 65, 71, 77, 82 °C
- Meßbereich III = 71, 77, 82, 88, 93, 99, 104, 110°C
- Meßbereich IV = 116, 121, 127, 132, 138, 143, 149, 154°C

Die Vorab-Auswahl der zu messenden Armaturen wurde so getroffen, daß möglichst alle Ventile mit Mehrfachausfällen und eine statistisch repräsentative Anzahl aller pneumatischen bzw. magnetischen Ventiltypen erfaßt werden sollten. Das Aufkleben der Temperaturmeßstreifen machte jedoch erhebliche Schwierigkeiten. So mußten Schutzkleidung, insbesondere Gummihandschuhe getragen werden. Die Armaturen mußten vor Aufkleben der Meßstreifen mit organischem Lösungsmittel von Fett gereinigt werden. Zum Teil herrschten erhöhte Temperaturen, da die Kreisläufe während des Aufbringens in Betrieb waren. Ein Teil der zur Messung eingeplanten Armaturen lag in erhöhten Dosisleistungsbereichen. Aus diesen Gründen konnten nur die Temperaturen der in der folgenden Tabelle angegebenen Armaturen bestimmt werden.

Tabelle 11. Temperaturmessungen an Ventilen

Ventiltyp	pneum.G	pneum.K	magn.C	magn.L	mot.C
Anzahl vorhandener Ventile	285	209	701	114	6
zur Messung vorgeschlagen	96	50	102	26	4
Anzahl der ausgewerteten	75	43	51	23	3
Verteilung auf Ausfälle:					
keine	20	19	15	20	-
1-mal	22	9	21	2	-
2-mal	16	12	10	1	1
3-mal	10	2	4	-	1
> 3-mal	7	1	1	-	1

In den letzten 5 Zeilen der Tabelle ist eine Unterscheidung in die Zahl von Ausfällen der einzelnen Ventile vorgenommen worden. Hierbei wurde davon ausgegangen, daß bei Vorhandensein einer Temperaturabhängigkeit diese sich bei Ventilen, die mehrfach ausfielen, besonders bemerkbar machen müßte.

#### 4.5.2 Meßergebnisse

Die Temperaturmeßaufkleber wurden im Mai 1988 aufgebracht und in der folgenden Abschaltpause im Oktober 1988 abgelesen. Bei der Auswertung stellte sich heraus, daß einige Ventile Temperaturen angenommen hatten, die über die jeweiligen Meßbereiche hinausgingen. Aus diesem Grunde erfolgte die Auswertung in je 2 Temperaturklassen:

- für pneumatische Ventile Temperaturen  $\leq 54^{\circ}\text{C}$  und  $\geq 65^{\circ}\text{C}$
- für magnetische Ventile Typ "C" Temp.  $\leq 60^{\circ}\text{C}$  und  $\geq 77^{\circ}\text{C}$

Fast alle Ventile der Typen "magn. L" und "mot.C" zeigten jeweils dieselbe Arbeitstemperatur an. Eine Temperaturabhängigkeit war daher nicht festzustellen.

Als erstes wurden die mittleren Ausfallraten der Armaturen in den Temperaturbereichen bestimmt. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle 12 wiedergegeben.

Tabelle 12. Ausfallraten ausgewählter Armaturen in verschiedenen Temperaturbereichen

Ventiltyp	pneu. G		pneu. K		magn. C	
Temperatur	$\leq 54$	$\geq 65$	$\leq 54$	$\geq 65$	$\leq 60$	$\geq 77^{\circ}\text{C}$
Ausfallrate	12,3	11,4	11	7,1	10,4	$8 \cdot 10^{-3}/\text{h}$
Zum Vergleich die gemessenen Ausfallraten aller erfaßten Ventile der entsprechenden Typen:						
Ausfallrate	6		4,3		$4 \cdot 10^{-3}/\text{h}$	

#### 4.5.3 Auswertung

Aus den Meßergebnissen lassen sich folgende 2 Schlußfolgerungen ziehen:

1. Die Ausfallhäufigkeit scheint mit der Temperatur abzunehmen. Da hierfür kein plausibler Grund vorliegt, ist dies wahrscheinlich auf die große Streuung zurückzuführen, die durch die unterschiedliche Zahl der Armaturen in den einzelnen Temperaturklassen hervorgerufen wurde.
2. Die mittlere Ausfallrate aller Armaturen ist kleiner als die mit der Temperaturmessung erfaßte. Dies liegt, wie oben erwähnt, an der Auswahl der zu messenden Armaturen, da besonders Mehrfachausfälle untersucht werden sollten.

In der folgenden Tabelle 13 sind die Verteilungen der drei Ventilgruppen auf unterschiedliche Ausfallhäufigkeiten in Abhängigkeit von der Temperatur wiedergegeben. Die jeweiligen Ausfallhäufigkeiten der Temperaturklassen wurden auf gleiche Ventilzahl normiert. Danach wurde die Nullhypothese aufgestellt, daß keine Temperaturabhängigkeit existiert. Für die jeweilige Ventiltyp wurde die Nullhypothese mittels  $\chi^2$ -Test überprüft.

Tabelle 13. Verteilung ausgewählter Ventile auf die Ausfallhäufigkeit M und Temperatur

Ventiltyp M	pneu.G		pneu.K		Magn.C	
	$\leq 54$	$\geq 65$	$\leq 54$	$\geq 65$	$\leq 60$	$\geq 77^\circ\text{C}$
0-Ausfälle	17	3	13	6	2	13
1-fach	19	3	5	4	4	17
2-fach	13	3	7	5	4	6
3-fach	7	3	2		1	3
4-fach	2		4			1
>4-fach	5					
$\chi^2$ gem.	3.82		5.1		9.6	
$\chi^2$ (n; 95%)	7.82		5.99		7.8	

Hiernach läßt sich für die pneumatischen Ventile keine Temperaturabhängigkeit der Ausfallhäufigkeit herleiten, während die Aussage für die Magnetventile nicht eindeutig ist. Die Abweichungen sind hier in den relativ wenigen Mehrfachausfällen bei erhöhten Temperaturen begründet, was schon oben als technisch nicht sinnvoll beurteilt wurde. Eine Temperaturabhängigkeit der Ausfallwahrscheinlichkeiten läßt sich daher nicht ableiten. Ebenso wenig lassen sich die Mehrfachausfälle im Bereich des Stahlgerüsts 29/30 und um die Membrankompressoren MK 6 mit erhöhten Betriebstemperaturen begründen.

## 5. Schlußfolgerungen

Da die Daten für die Erfassung der Armaturenausfälle aus Betriebsunterlagen entnommen wurden, die zum Teil nur als Informationsunterlagen für die Folgeschicht oder die Wartungsabteilung dienten und nicht unter den Gesichtspunkten einer Schadensstatistik geführt wurden, war die Auswertung mit Schwierigkeiten verbunden. Nur teilweise ließen sich Fehlerart und -ursache von Ausfällen herleiten. Desgleichen konnten reine Wartungsmaßnahmen, wie z.B. vorsorglicher Austausch von Magnetspulen, nicht immer von echten Magnetspulenversagen unterschieden werden. Um daher die Ausfälle konservativ abzuschätzen, wurde jede Erwähnung eines Ventils in den relevanten Unterlagen als Ausfall gezählt, in der Annahme, daß jeder Erwähnung zumindestens eine Fehlfunktion vorangegangen sein mußte.

Die Ergebnisse der Untersuchungen, die sich über die Ausfälle der Jahre 1970 bis 1984 erstreckten, lassen sich wie folgt zusammenfassen:

### 1.) Abhängigkeit der Ausfallraten von der Zeit.

Wesentliche Änderungen der Ausfallraten konnten nur in den Jahren 1970 und 1977 festgestellt werden. Die Ursachen hierfür lagen in einer Austauschaktion von Magnetventilen im Jahr 1970 und in Wiederkehrenden Druckprüfungen aller Behälter im Jahr 1977. Sieht man von diesen erwähnten Ereignissen ab, konnte eine systematische Änderung der Ausfallraten mit der Zeit nicht festgestellt werden.

### 2.) Abhängigkeit von der Schaltzahl

Die Schaltzahl von Armaturen wurde betrieblich nicht aufgezeichnet. Daher konnten die Belastungen der Ventile durch die Häufigkeit von Betätigungen nur in einzelnen Fällen abgeschätzt werden. Danach fielen Ventile, die in Zweipunktregelungen mit einer Schaltzahl von über 150000 Schaltungen/a eingesetzt waren, verstärkt aus. Demgegenüber konnte an



ausgewählten Ventilen mit bis zu 80000 Betätigungen in den betrachteten 15 Jahren keine Abhängigkeit der Ausfallraten von der Schaltzahl festgestellt werden.

### 3.) Abhängigkeit vom Einsatz in unterschiedlichen Kreisläufen

Ventile, die um die Membrankompressoren MK6 eingesetzt waren, fielen relativ häufig aus. Sieht man von diesen Ventilen und den zur Zweipunktregelung eingesetzten Armaturen ab, so konnte eine statistisch eindeutige Abhängigkeit unterschiedlicher Ausfallhäufigkeiten vom Kreislauf, in den die Ventile eingesetzt waren, nicht festgestellt werden. Stattdessen können die Unterschiede der mittleren Ventilausfallraten in den verschiedenen Kreisläufen mit der unterschiedlichen Anzahl eingebauter Ventiltypen erklärt werden.

### 4.) Analyse von Mehrfachausfällen der einzelnen Armaturen

Eine Analyse der Ausfallhäufigkeit der einzelnen Armaturen erbrachte eine Häufung von Mehrfachausfällen von Ventilen, die in Verbindungsleitungen zu und von den Membrankompressoren MK6a und MK6b eingesetzt sind. Es konnte dabei weder eine Abhängigkeit vom Aufstellungsort noch von der Ventilterperatur nachgewiesen werden. Dasselbe gilt für die Mehrfachausfälle von Membranen in einigen Sicherheitsventilen. Möglich wäre eine Beanspruchung dieser Ventile durch pulsierende Belastung aus dem Betrieb der Membrankompressoren. Mithilfe der durchgeführten Analysen konnten die beobachteten Konzentrationen von Mehrfachausfällen nicht erklärt werden. Hier könnten vielleicht Nachuntersuchungen nach Stilllegung des AVR-Reaktors eine Erklärung bringen.

### 5.) Die festgestellten Ausfallraten sind in Tabelle 10 und den Abb. 5 + 6 für die unterschiedlichen Armaturentypen zusammengefaßt wiedergegeben.

## 6. Abbildungen und Tabellen

Abb. 1. Erläuterung der Abgrenzung von "Armaturenausfälle"

Abb. 2. Ausfallraten (Armaturenausfälle/Jahr)

Abb. 3. Ausfallraten aller Armaturen (ohne Spulenaustausch 70)

Abb. 4. Ausfallraten aller Armaturen in Abhängigkeit von der KKW-Verfügbarkeit

Abb. 5. Ausfallraten von Magnet- und Motorregelventilen

Abb. 6. Ausfallraten von pneumatischen Armaturen

Abb. 7. Beispiele von Temperaturmeßaufklebern

Tab. 1. Alle Armaturenausfälle in den Jahren 1970-1984

Tab. 2. Armaturenausfälle in den Jahren 1970-1984 ohne Spulenaustausch

Tab. 3. Anzahl der Betätigungen von Spülgasarmaturen bei den Ein- und Ausschleusvorgängen der Kugelelemente (ca.215000) und hierbei registrierte Armaturenausfälle

Tab. 4. Armaturenausfälle in den Regelstrecken

Tab. 5. Verteilung der Ausfälle auf wesentliche Armaturengruppen

Tab. 6. Verteilung der Ausfallraten auf wesentliche Armaturengruppen

Tab. 7. Auswertung der Streuung von Ausfallraten zusammengefaßter Armaturentypen nach dem  $\chi^2$ -Test

Tab. 8. Verteilung von Mehrfachausfällen der Steuergasventile und der angesteuerten pneumatischen Armaturen auf die Bühnen und Stahlgerüste im Schutzbehälter

Tab. 9. Vergleich von Mehrfachausfällen mit einer Poissonverteilung

Tab.10. Zusammenfassende Darstellung der Ausfallraten unterschiedlicher Armaturen

Tab.11. Temperaturmessungen an Ventilen (im Text, Seite 20)

Tab.12. Ausfallraten ausgewählter Armaturen in verschiedenen Temperaturbereichen (im Text, Seite 22)

Tab.13. Verteilung ausgewählter Ventile auf Ausfallhäufigkeit M und Temperatur (im Text, Seite 23)

Tabelle 1: Alle Armaturenausfälle in den Jahren 1970 - 1984

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	18a
1	Anzahl der Ausfälle in den Jahren																		
2	Armaturen																		
3	W 1	19	13	2	1	1	0	4	0	7	0	4	0	0	1	0	0	33	13,22
4	W 3	415	43	15	19	2	15	5	5	27	5	7	10	17	18	5	19	212	3,89
5	W 4a	64	2	2	1	0	0	0	2	0	0	4	0	1	2	0	1	15	1,78
6	W 4b	177	49	3	8	3	16	2	5	18	8	4	3	7	7	0	14	147	6,32
7	W 4c	340	36	13	14	3	9	23	6	33	11	12	10	18	23	14	13	238	5,33
8	W 5	201	19	3	19	12	3	8	9	11	3	1	1	1	4	1	1	96	3,63
9	W 6b	278	6	1	0	1	2	3	2	8	1	0	3	4	4	0	1	36	0,99
10	W 12	200	6	5	6	1	7	3	3	8	0	5	3	7	5	0	2	61	2,32
11	W 19b	585	86	12	3	2	4	15	15	14	13	12	5	1	5	12	15	214	2,78
12	Summe	2279	260	56	71	25	56	63	47	126	41	49	35	56	69	32	66	1052	40,26
13	Ausfallrate: 10 <sup>-6</sup> /h	13 2,81 3,56 1,25 2,81 3,16 2,35 6,31 2,05 2,45 1,75 2,81 3,46 1,6 3,31																	3,51



**Tabelle 3: Anzahl der Betätigungen von Spülgasarmaturen bei den Ein- und Ausschleusvorgängen der Kugelelemente (ca. 215.000) und hierbei registrierte Armaturen-Ausfälle**

1	2	3	4
Ventil-Nr.	Ventil-Typ	Betätigungen	Ausfälle
W 4c.41.3	pneu.Gas K	34000	0
4c.41.4	"	34000	3
4c.41.7	"	22000	4
4c.41.8	magn. C	44000	0
4c.41.11	"	22000	0
4c.41.12	"	22000	0
4c.41.39	"	34000	4
4c.41.42	pneu.Gas K	34000	1
4c.41.47	"	44000	0
4c.41.60	pneu.Luft G	22000	1
4c.41.713	pneu.Gas K	78000	0
zugehörige Vorsteuerarmaturen			
W 6b.41.481	Magnet L	34000	0
6b.41.483	"	34000	0
6b.41.487	"	22000	0
6b.41.503	"	34000	0
6b.41.507	"	44000	0
W 19b.41.363	Magnet C	22000	0
6b.41.183	Magnet L	78000	0

Tabelle 4: Armaturen-Ausfälle in den Regelstrecken

Kreislauf	Regelung	Armaturen	Ausfälle	Schaltheufigkeit/a, Armatur
W 1	Reaktorzu- regelung	4 Magnet	17	140.000
W 3	Zusatzgas	4 Magnet	18	?
	MK 4a/b	2 Motor	7	?
	(Summe)	6	25	
W 4b	Stützgas	4 Magnet	18	140.000*)
		2 pneum.	9	
	Abschaltgas	7 pneum.	30	?
	Sperrgas 1 Zuregelung	2 Motor	8	?
	(Summe)	15	65	
W 4c	1 ata Zuregelung	4 pneum.	17	?
W 5	Sperrgas 2	8 Magnet	18	150.000
W 12	Reingas	6 pneum.	26	?
	Speicher/ Puffer	2 Motor	12	?
	(Summe)	8	36	

\*) Regelstrecke seit 1980 außer  
Betrieb seitdem keine Ausfälle.

Tabelle 5: Verteilung der Ausfälle auf wesentliche Armaturengruppen

Armaturen	:	Z	W1 A	Z	W3 A	Z	W4a A	Z	W4b A	Z	W4c A	Z	W5 A	Z	W6b A	Z	W12 A	Z	W19 A	Summe Z A
magn.C1	:	13	30	101	47	2	0	23	24	18	10	24	31	95	22			80	59	356 223
Magn.C2	:																	345 147		345 147
Magn.L	:			8	7					2	0			96	11			8	3	114 21
Magn.R	:			4	3	6	2			11	2									21 7
pneu.LuftG:	:	1	1	59	33	12	6	76	67	88	86	25	13	15	1	5	13	4	4	285 224
pneu.LuftK:	:			28	5			4	10	18	22	14	4					10	0	74 41
pneu.Gas K:	:	1	1	54	36	6	1			54	37	20	1							135 76
Hand P	:			33	1					37	0	5	0	12	0				0	87 1
Hand Ar	:			2	0					2	0			3	0	86	4	6	0	99 4
Hand Ai	:			14	1	1	0	40	0	7	3	12	0							74 4
Hand L	:															50	0			50 0
Hand B	:																	49	1	49 1
Hand G	:	4	1	65	2	20	1	20	3	63	9	77	8	20	0	14	4			283 28
RV-pneu	:			2	5					3	13	1	5							6 23
RV-Motor	:			2	7	6	3	3	8	1	1	1	1			4	16			17 36
Sich.-Vent:	:			13	19			1	6	18	49	7	32	4	0	3	7			46 113
Summe	:	19	33	385	166	53	13	167	118	322	232	186	95	245	34	162	44	502	214	2041 949

Z = Anzahl der betreffenden Armaturen im jeweiligen Kreislauf  
A = Anzahl der registrierten Ausfälle

Tabelle 6: Verteilung der Ausfallraten auf wesentliche Armaturengruppen (in 10<sup>-6</sup>/h)

Armaturen :	W1	W3	W4a	W4b	W4c	W5	W6b	W12	W19b	Summe										
	Z rel	Z rel	Z rel	Z rel	Z rel	Z rel	Z rel	Z rel	Z rel	Z rel =10 <sup>-6</sup> /h										
magn.C1	13	18	101	3,5	2	0	23	7,9	18	4,2	24	9,8	95	1,8	80	5,6	356	4,77		
Magn.C2															345	3,2	345	3,24		
Magn.L			8	6,7					2	0			96	0,9	8	2,9	114	1,4		
Magn.R			4	5,7	6	2,5			11	1,4							21	2,54		
pneu.LuftG:	1	7,6	59	4,3	12	3,8	76	6,7	88	7,4	25	4	15	0,5	4	7,6	285	5,98		
pneu.LuftK:			28	1,4			4	19	18	9,3	14	2,2			10	0	74	4,22		
pneu.Gas K:	1	7,6	54	5,1	6	1,3			54	5,2	20	0,4					135	4,28		
Hand P			33	0,2					37	0,2	5	0	12	0			87	0,09		
Hand Ar			2	0					2	0			3	0	6	0	99	0,31		
Hand Ai			14	0,5	1	0	40	0	7	3,3	12	0					74	0,41		
Hand L															50	0	50	0		
Hand B																				
Hand G	4	1,9	65	0,2	20	0,4	20	1,1	63	1,1	77	0,8	20	0	49	0,2	283	0,75		
RV-pneu			2	19					3	33	1	38					6	29,2		
RV-Motor			2	27	6	3,8	3	20	1	7,6	1	7,6			4	30	17	16,1		
Sich.-Vent:			13	11			1	46	18	21	7	35	4	0	3	18	46	18,7		
Summe	19	13	385	3,3	53	1,9	167	5,4	322	5,5	186	3,9	245	1,1	162	2,1	502	3,2	2041	3,54

Z = Anzahl der Armaturen im Kreislauf  
rel = Ausfallrate des betreffenden Armaturentyps im Kreislauf



Tabelle 7: Auswertung der Streuung von Ausfällen \*) zusammengefaßter Armaturentypen nach dem  $\chi^2$ -Vergleichstest (s. Text)

Typ/Kreislauf	N 3 Z A	E:M	Chi <sup>2</sup> :M	E	Chi <sup>2</sup> :Z	N 4b Z A	E:M	Chi <sup>2</sup> :M	E	Chi <sup>2</sup> :Z	N 4c Z A	E:M	Chi <sup>2</sup> :M	E	Chi <sup>2</sup> :Z	N 19b Z A	E:M	Chi <sup>2</sup> :M	E	Chi <sup>2</sup> :Z				
Alle Magnet	109	20	29,35	2,98	23,74	0,59	19	6	5,95	0,00	4,14	0,84	31	12	11,45	0,03	6,75	4,081	433	94	85,39	0,87	94,30	0,00
Alle Pneum.	141	74	37,96	34,21	68,45	0,45	71	38	22,25	11,16	34,47	0,36	147	82	54,29	14,14	71,36	1,586	14	4	2,76	0,56	6,80	1,15
Alle Hand	114	4	30,69	23,21	6,835	1,18	60	3	18,80	13,28	3,60	0,10	109	12	40,26	19,83	6,54	4,569	55	1	10,85	8,94	3,30	1,60
Summe	364	98				150	47				287	106				502	99							
Chi <sup>2</sup> gemessen:			60,40					24,43					34,00						10,36					
Chi <sup>2</sup> (2;95%)			5,99					5,99					5,99						5,99					
Chi <sup>2</sup> (1;95%)			3,84					3,84					3,84						3,84					
Chi <sup>2</sup> ohne Handarmatur			37,19					11,16					14,17						1,42					

Typ/Kreislauf	N 5					N 6b						
	Z	A	E:M	Chi <sup>2</sup> :M	E	Chi <sup>2</sup>	Z	A	E:M	Chi <sup>2</sup> :M	E	Chi <sup>2</sup>
Alle Magnet	16	9	3,31	9,76	3,48	8,73	191	33	26,95	1,36	41,59	1,78
Alle Pneum.	59	18	12,22	2,74	28,64	3,95	15	1	2,12	0,59	7,28	5,42
Alle Hand	94	8	19,47	6,75	5,64	0,99	35	0	4,94	4,94	2,10	2,10
Summe	169	35					241	34				
Chi <sup>2</sup> gemessen:				19,25							6,89	
Chi <sup>2</sup> (2;95%)				5,99							5,99	
Chi <sup>2</sup> ohne Handarmatur				3,84							3,84	
				12,49							1,95	

Typ/Kreislauf	Z	Summe A	E	Chi <sup>2</sup>	Chi <sup>2</sup> (n;95%)
Alle Magnet	799	174	0,218	16,02	11,1
Alle Pneum.	447	217	0,485	12,92	11,1
Alle Hand	467	28	0,060	10,54	11,1
Summe	1713	419	0,245		

Z = Anzahl betrachteter Armaturen  
A = Anzahl der Ausfälle  
E:M = Erwartungswert bezogen auf die Ausfälle im Kreislauf  
E = Erwartungswert bezogen auf die Ausfälle des Armaturentyps

$$\chi^2 = (A_i - E_i)^2 / E_i \quad \text{bzw.} \quad \sum (A_i - E_i)^2 / E_i$$

$\chi^2$ :M = wie oben jedoch bezogen auf den Kreislauf

\*) Ohne Magnetspulentausch, Zweipunktregelventilen und Ventilen um MK 6a+b

Tabelle 8: Verteilung von Mehrfachausfällen der Steuergasventile (W19b) und der angesteuerten pneumatischen Armaturen auf die Bühnen und Stahlgerüste im Schutzbehälter

Bühne	34,5m						30m														
Stahlgerüst	75	69	71	76	78/73	68	63	:	64	:	62	:	66	:							
Kreislauf	19 b	19 b	19 b	19 b	19 b	19 b	19b	1	12	19b	4b	3	19b	4c	19b	6b	4c	19b	4c	4b	5
Armat.-Zahl	6	7	5	5	6	4	6	1	5	6	4	2	7	1	9	5	4	5	2	1	2
1xAusfall	2	2	1	2	4		4		1	4	3		3	1	2		1	2		4	
2xAusfall		1	1	2					1	2		2			2		1				
3xAusfall			1						1						1		1				
>3x-Ausfall									2		1										
Gesamtausfälle	2	4	6	6	4	0	4	0	14	8	7	4	3	1	9	0	6	2	0	4	0

25, 5a								21 a															
58 / 61		:57 :		:59 :60				27 / 30		:		38		:40 /41 :		38		:45/ 47				: 34	
19b	6b	4c	19b	19b	2	19b	4c	19b	4c	3	19b	4b	4c	19b	3	4b	5	19b	4c	3	5	19b	5
4	1	1	32	5	3	8	8	53	35	15	20	16	1	10	8	4	2	7	15	14	11	13	13
1			19	1	2	4	2	17	5	2	8	8		5	1	4			3	2	3	3	4
			1			1	2	5	4	1	3	5						2	4	2	1	1	1
								2	2	1		2			1			2	3				1
			1		1	1	1	1	6									1					
1	0	0	25	1	6	10	11	37	48	7	14	24	0	5	1	7	0	4	25	15	5	5	9

Bühne	11,6m										unterhalb 11,6m						
Stahlgerüst	24 / 25		: 19		:22 /23:		18 /16		: 14		6		: 5		:3/4/8/9		
Kreislauf	19b	6b	4b	19b	3	19b	4a	19b	4c	19b	19b	4b	4a	19b	4c	19b	4c
Armat.-Zahl	23	8	15	12	12	18	8	10	10	39	59	51	2	20	12	22	3
1xAusfall	10		4	2		4	3	1	2	9	30	17		2	2	5	1
2xAusfall			3		1	1	1		1	2	2	3			1	2	1
3xAusfall			2							1		1			1		1
>3x-Ausfall			2							3							
Gesamtausfälle:	10	0	27	2	2	6	5	1	4	29	34	26	0	2	7	9	6

Tabelle 9: Vergleich von Mehrfachausfällen mit einer Poissonverteilung \*)

Bühne	:34,5	:30m	:25,5m	:21 m	:11,6m	:< 11,6m						
Kreislauf	:19b Poisson:	19b Poisson:	19b Poisson:	19b Poisson:	19b Poisson:	19b Poisson:						
Arm.-Zahl	:33 $\lambda=0,67$	:33 $\lambda=0,79$	:49 $\lambda=0,76$	:103 $\lambda=0,63$	:102 $\lambda=0,47$	:101 $\lambda=0,45$						
1xAusfall	11	11,3	15	11,8	25	17,4	33	34,6	26	30	37	29
2xAusfall	4	3,8	4	4,7	2	6,6	11	10,9	3	7	4	6,6
3xAusfall	1	0,8	1	1,2	0	1,7	2	2,3	1	1,1	1	
> 3xAusfall					2	0,3	1	0,4	3	0,1		0,1
Ges. Ausfälle	22	26	37	65	48	45						
Chi^2(19b/Pois:	0,2	1,1	11,1	1,1	86	5,2						
Chi^2(3, 95%)=7, 81												

\*) Poissonverteilung für Mehrfachausfälle n auf der jeweiligen Bühne in den Jahren 1970-1984

$\lambda$  = Mittlere Ausfallraten ( in 15 Jahren auf der betreffenden Bühne )

$$f(n) = e^{-\lambda} \cdot \lambda^n / n !$$

Tabelle 10. Zusammenfassende Darstellung der Ausfallraten unterschiedlicher Armaturen

Ausfallraten von Armaturengruppen	Anzahl Ausfälle	in	15	Jahren
Armaturengruppe und Merkmal	Z	absolut	min**) 10 <sup>-6</sup> /h	max. **) Varianz*)
Magnetarmaturen insgesamt	836	398	3,30	3,90
Magnetarmaturen allgemein (ohne bes.Belastung ***)	816	184	1,50	1,90
Motor-Regelventile	17	36	12,00	21,00
pneum. Armaturen einschl. Ausfälle der Vorsteuerarmaturen	494	546	7,80	9,00
pneum. Armaturen ohne Ausfälle der Vorsteuerarmaturen	494	341	4,80	5,70
pneumatische Armaturen ohne besondere Belastungen	467	226	3,30	4,20
pneumatische Regelventile	6	23	19,00	41,00
Handarmaturen	642	38	0,35	0,59
Sicherheitsventile (Wechsel der Dichtfolien)	46	113	15,90	21,80

\*) Standardabweichung unter der Annahme einer Poissonverteilung

$$\sqrt{2n; \frac{1-F}{2}}$$

\*\*) + \*\*\*) = Minimalwert bzw. Maximalwert ausgerechnet nach

Ausf.rel.=

2 \* Beobachtungszeit

$$\sqrt{2(n+1); \frac{1+F}{2}}$$

bez. =

2 \* Beobachtungszeit

mit n = Freiheitsgrade und F = Vertrauensgrad (= 95% gewählt)

\*\*\*\*) Ohne Magnetspulenaustausch und Zweipunktregelventile sowie Armaturen um die Membrankompressoren 6a+b

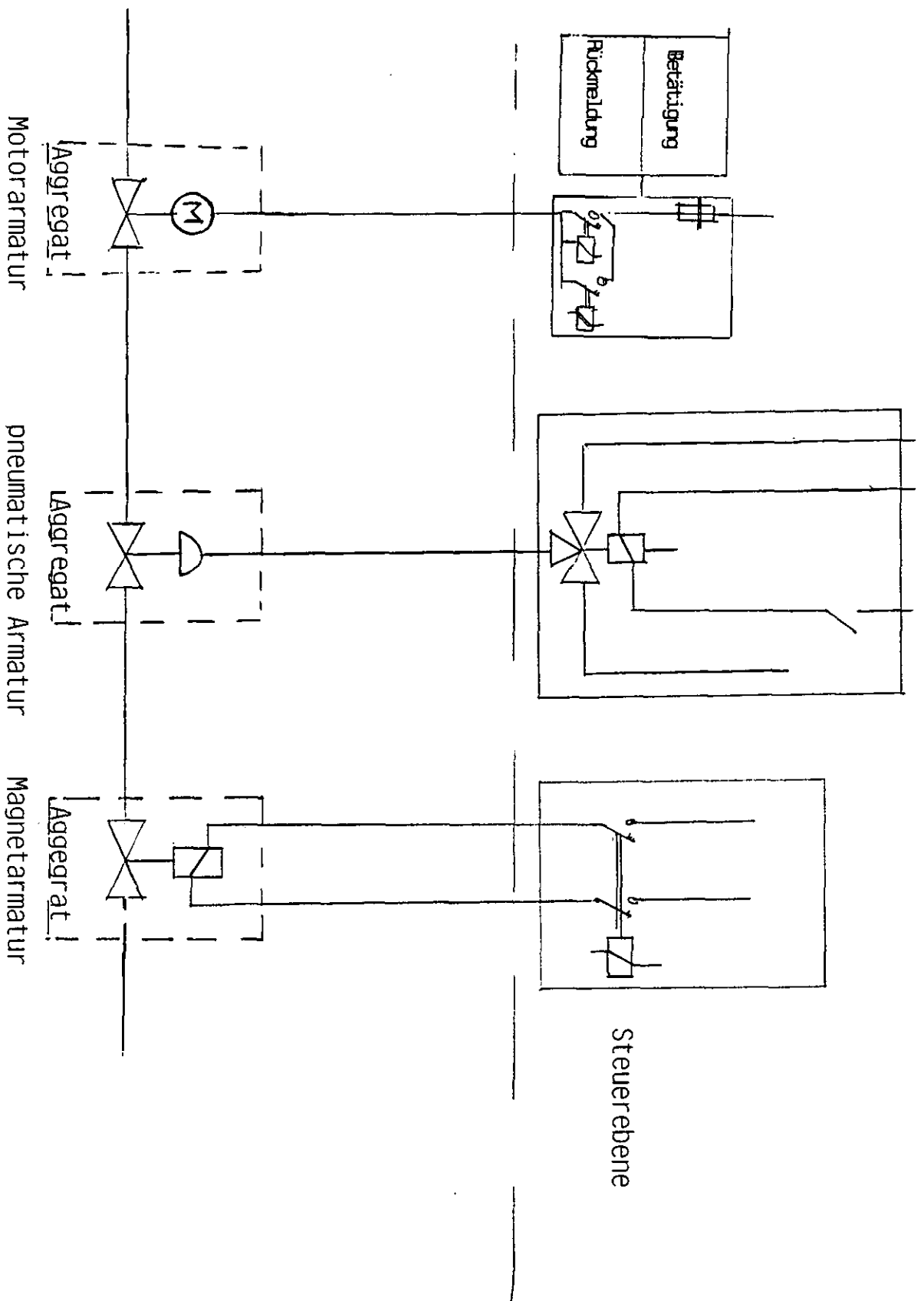
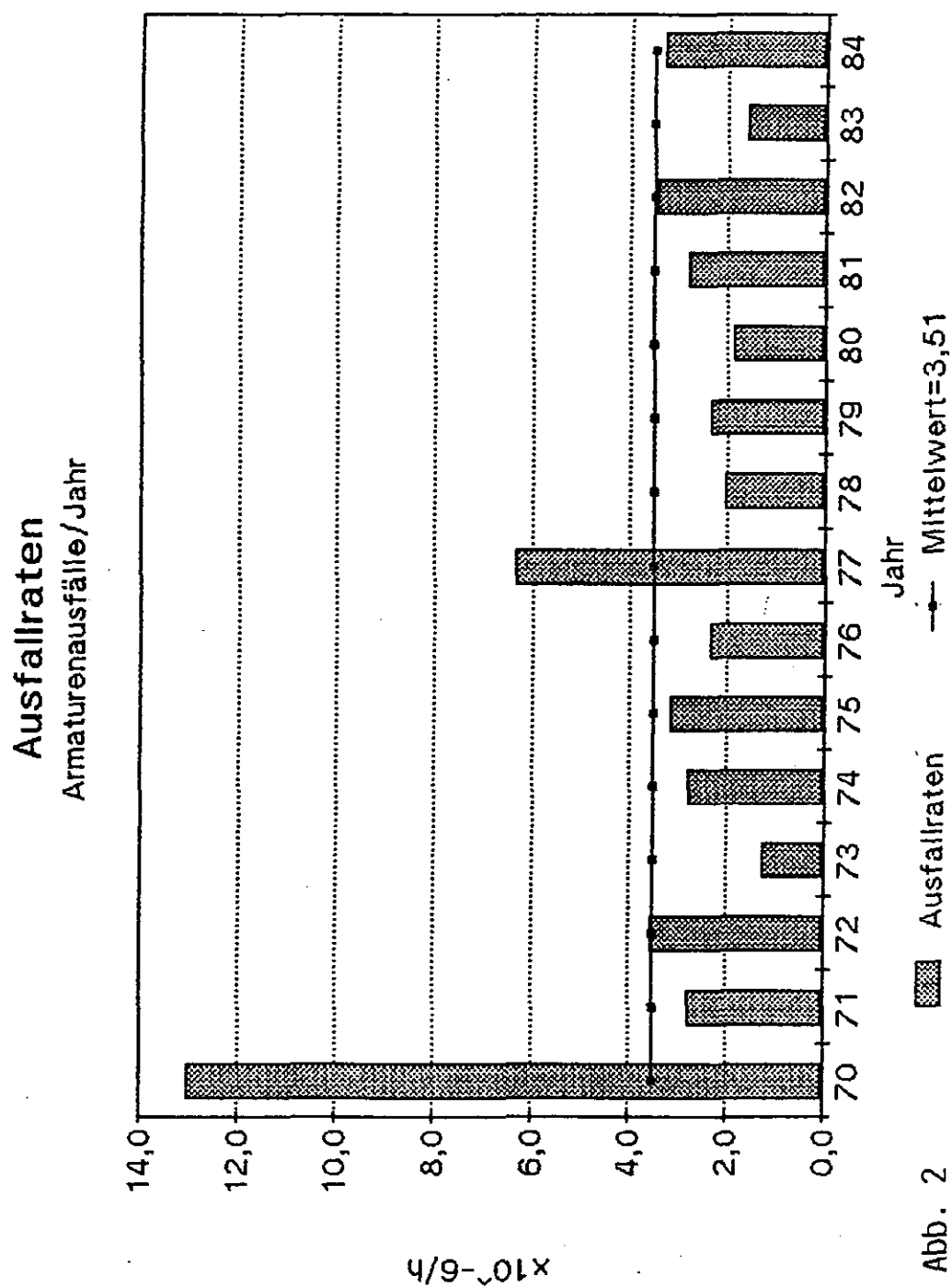


Abb.1 Zur Erläuterung der Abgrenzung von Armaturenfällen :

Es wird immer die Störung des Aggregats betrachtet



# Ausfallraten aller Armaturen ohne Spulenaustausch 1970

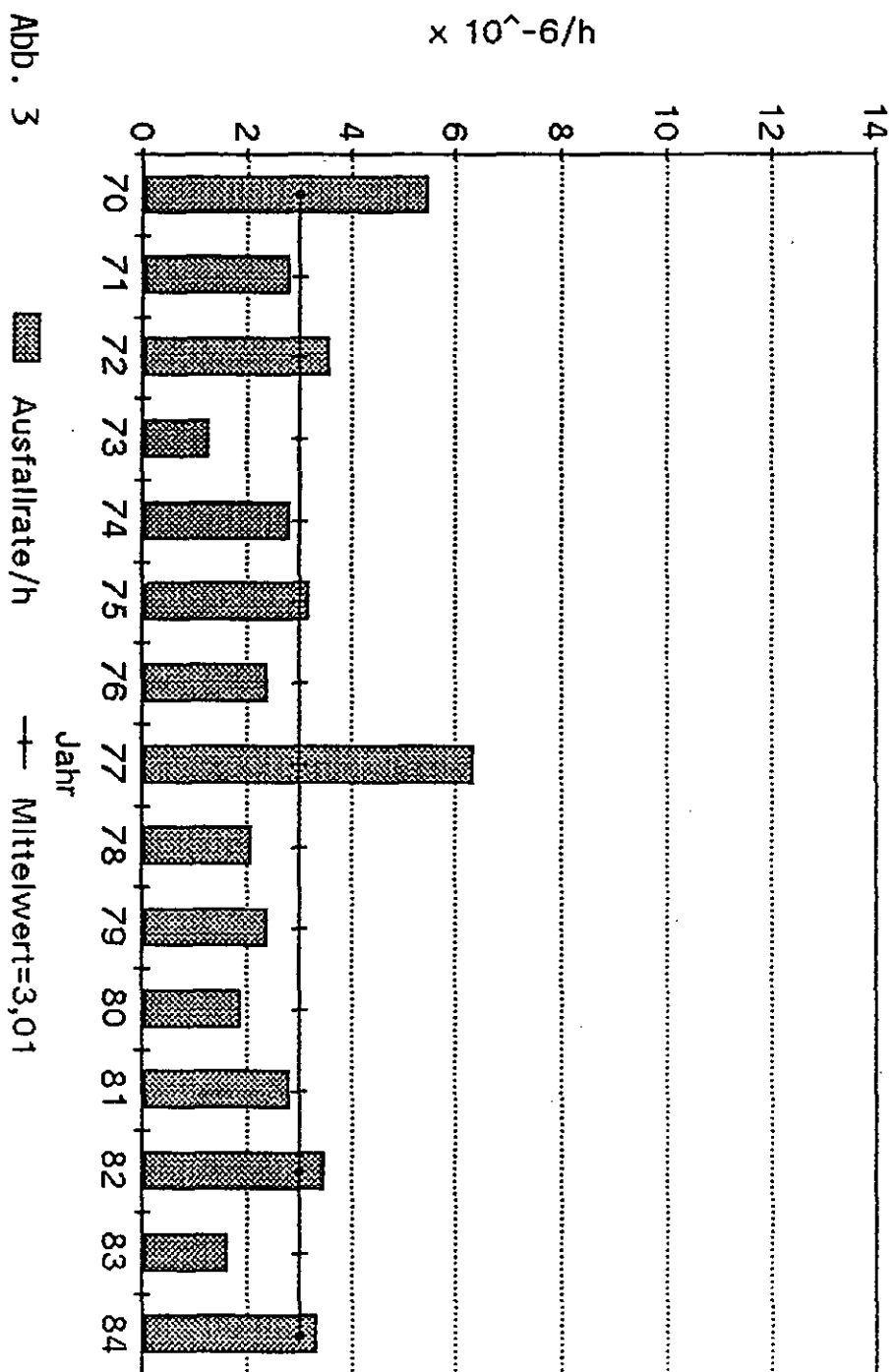


Abb. 3

# **Ausfallraten aller Armaturen** In Abhängigkeit von der KKW-Verfügbarkeit

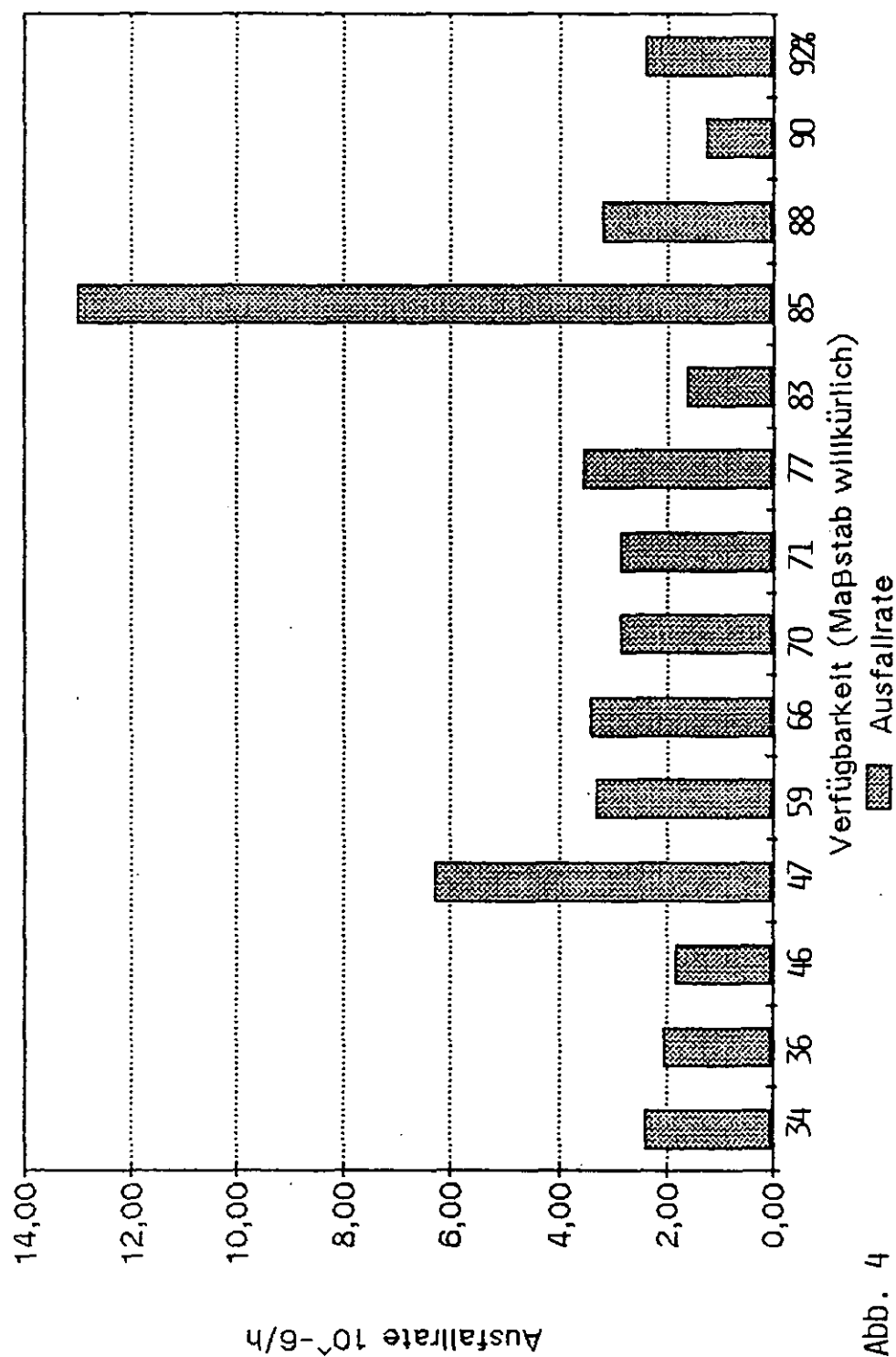


Abb. 4



# Ausfallraten von Magnet- und Motorregelventilen

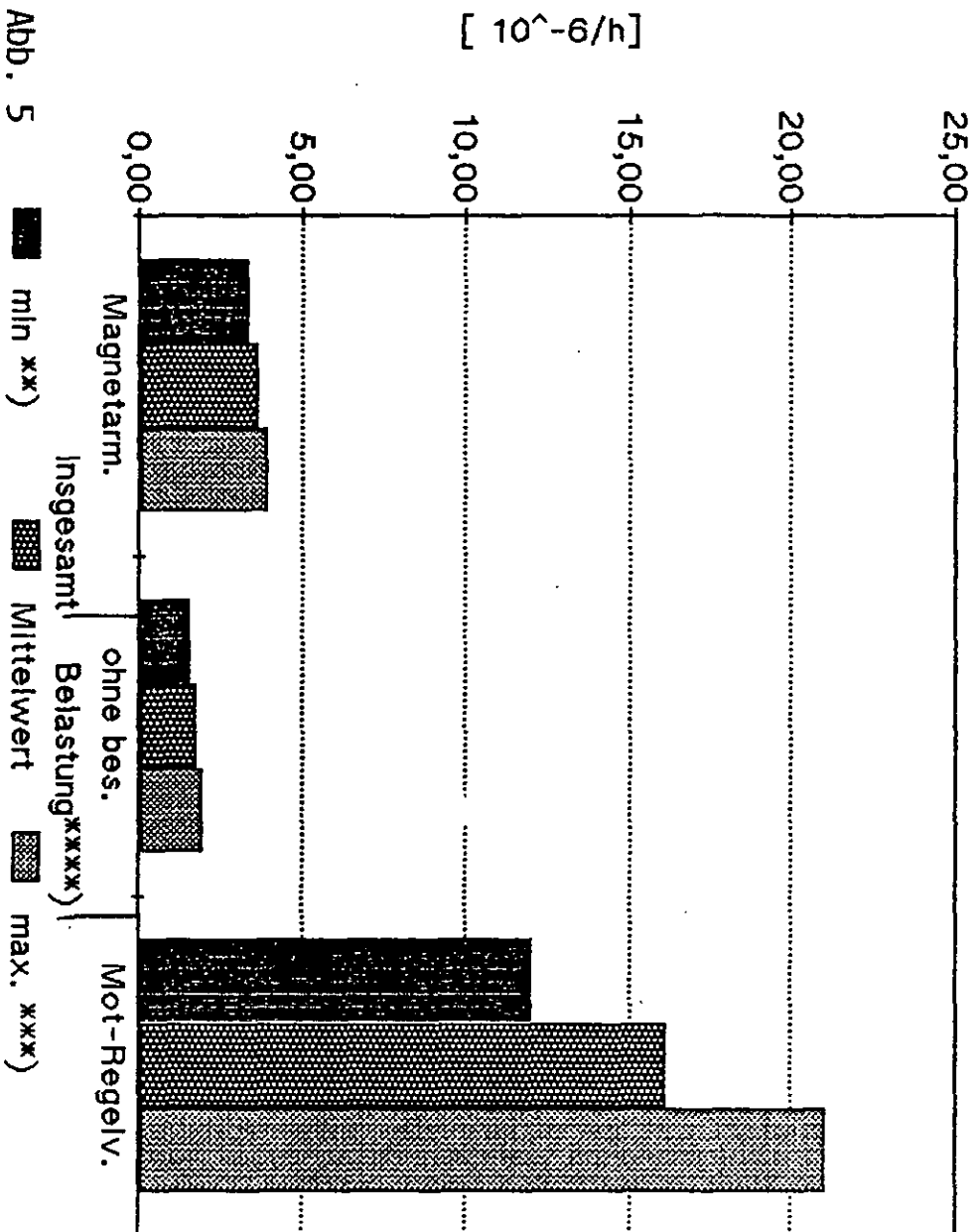


Abb. 5

\*\*, \*\*\*, \*\*\*\*) = S.Text zu Tabelle 10

# Ausfallraten von pneumatischen Armaturen

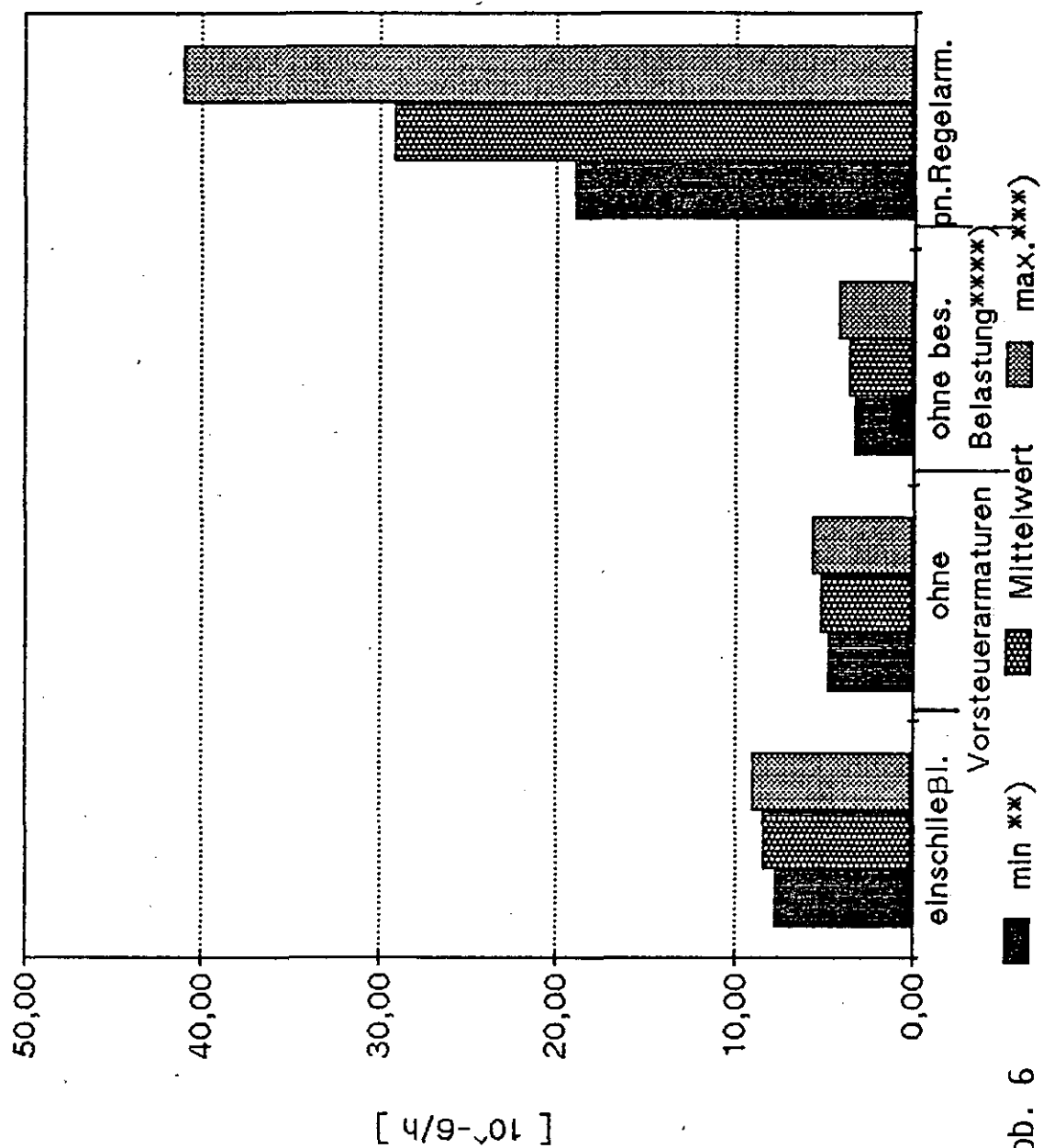


Abb. 6

(\*\*), (\*\*\*), (\*\*\*\*) = S. Text zu Tabelle 10

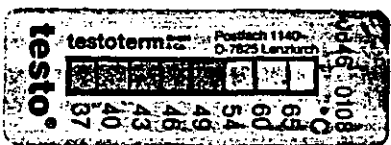


Abbildung 7. Beispiele von Temperaturmeßaufklebern

links: Meßbereich 37-65°C : gemessene Temperatur < 54°C

rechts : Meßber. 60-82°C : gemessene Temperatur ≈ 77°C